

자연대류 열전달을 고려한 AI 용탕 보온로의 수치해석

박상수* · 김병민**

Numerical Analysis of Molten Aluminum Furnace Considering Natural Convective Heat Transfer

S. S. Park and B. M. Kim

Abstract

Application of aluminum alloy has been increasing for most of industry area because aluminum has a good mechanical properties and castability, especially automotive field for weight reduction. But, Furnace industry is sluggish. The purpose of this study is numerical analysis of aluminum holding furnace for reasonableness estimation when we design for new model of furnace. The numerical simulation involving fluid flow of inside air and heat transfer to fireproof material is presented in order to improve the understanding of aluminum furnace. First of all, we are carried out numerically for the two dimensional inside convection and surface radiation heat transfer in a square enclosure. Subsequently, we are established the analysis method of aluminum furnace considering natural convective heat transfer

Key Words : Natural convection flows, Heat transfer, holding furnace, Conjugate heat transfer, Internal flow

1. 서론

현재 자동차 산업에 있어서 가장 중요한 과제 중의 하나는 차량 경량화와 함께 고기능성을 갖춘 부품의 생산과 개발이라 할 수 있다. 이러한 요구에 따라 차체 및 주요 부품에 사용되는 압연강판 및 강재 재질을 대신할 다양한 경량화 소재가 개발되어 점차 그 적용범위가 증가 하고 있다. 또한 이러한 경량화 제품의 대량생산, 성능 및 품질 만족도를 높이기 위해 제품개발 초기단계에서부터 경량화 소재를 채택을 고려하는 추세이다. 따라서, 알루미늄 및 알루미늄 합금의 수요 증가로 알루미늄 주조를 위한 노의 기술개발이 뒷받침 되어야 한다.

본 연구의 목적은 알루미늄 용탕 보온로의 개

발 시, 설계된 로 내부 공간의 적정성 평가를 위해 유한 요소법을 이용한 수치적 해석법을 정립하는데 있다.

연구 방법은 밀폐공간에서의 자연대류 열전달 및 열유동 경향을 파악하기 위해 이에 대한 연구를 선행하였고, 다음으로 알루미늄 보온로의 내부 열원에 의한 열유동과 내화재로의 대류 열전달에 관한 해석을 수행하였다.

자연대류 열전달은 기본적인 유체유동에서부터 열교환기 설계 등의 다양한 공학적인 응용성으로 인하여 많은 관심을 끌고 있는 분야이다. 레이놀즈수(Reynolds number)가 높은 강제대류 열전달(forced convective heat transfer)의 경우에는 온도장의 특성은 유체유동에 의하여 전적으로 좌우되며, 온도장의 유동장에 대한 영향은 오직 온도

* 부산대학교 정밀기계공학과
** 정밀정형 및 급형가공연구소

의 변화에 의한 물성치의 변화만이 유체유동에 영향을 미치게 된다. 그러나 자연대류 열전달의 경우는 유체유동이 온도장에 의하여 전적으로 좌우되기 때문에, 열전달 구조에 대한 이해는 유체유동 및 열전달 특성의 이해를 위한 핵심적인 요소이다.^(1, 2)

모든 유체의 물성치는 정도의 차이는 있으나 온도의 변화에 따라 그 값이 변하게 되며, 이 값의 변화는 유체유동 및 열전달 특성을 변화시킬 수 있는 주요한 인자이므로 공학적으로 주요한 관심분야가 중의 하나이다. 대류 열전달에 관여되는 유체의 물성치 중에서 주요한 물성치의 하나인 점성계수(viscosity)의 변화에 관한 영향은 이전에도 많이 연구되었다. 그러나 온도장에 큰영향을 줄 수 있을 것으로 예측되는 복사열전달, 열원의 위치와 외부로의 열손실을 동시에 고려해준 경우는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 온도에 따른 유체 물성치 변화와 열원의 위치에 따른 열유동 및 온도분포에 관한 연구를 하였다.

2. 사각형 밀폐공간의 대류열전달해석

2.1 이론해석

연구대상으로 취한 정사각형 밀폐공간의 기하학적 형상은 Fig. 1 과 같다. 밀폐공간 내에는 비압축성 점성유체가 채워져 있다. 유체의 유동은 Navier-Stokes 방정식에 의하여 지배되며, 2 차원 Cartesian 좌표계상에서 Boussinesq 가정에 의하여 무차원화 된 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} &= 0 \\ \frac{\partial UU}{\partial X} + \frac{\partial VU}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr}_0 \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(f_1 \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(f_1 \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \right] \\ \frac{\partial UV}{\partial X} + \frac{\partial VV}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr}_0 \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(f_1 \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(f_1 \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \right] \\ &+ Ra_0 \text{Pr}_0 (T - T_{ref}) \\ \frac{\partial UT}{\partial X} + \frac{\partial VT}{\partial Y} &= \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(f_2 \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(f_2 \frac{\partial T}{\partial Y} \right) \right] \end{aligned}$$

무차원화된 식에 나타난 주된 무차원수인 레이놀드수와 프란틀수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra_0 = \frac{g\beta\Delta T d^3}{k_0\nu_0}, \quad \text{Pr}_0 = \frac{c_p\rho_0\nu_0}{k_0} = \frac{\nu_0}{k_0}$$

위 식에 나타나는 유체의 물성치로서는 밀도 ρ ,

비열 c_p , 점성계수 μ , 열전도도 k 및 체적팽창계수 β 등이 있으며, 하첨자 0 는 기준온도에서의 상태를 나타낸다. 위 식을 무차원화하기 위하여 특성길이는 밀폐공간의 한변의 길이인 "d", 특성속도는 열확산계수와 특성길이의 비인 k_0/d , 특성온도의 차이로서는 고온면과 저온면의 온도차이를 이용하였다.

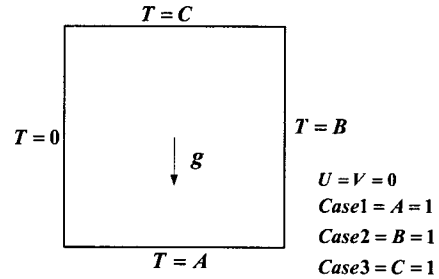


Fig. 1 Schematic of the geometry investigated

해석에 이용된 경계조건은 다음과 같다

모든 경계면에서 $U=V=0$

열원 경계면에서 $T=1$ (일정온도 경계조건) 또는

$$\dot{q} = -\frac{k}{k_0} \frac{\partial T}{\partial X} = 1 \quad (\text{일정열유속 경계조건})$$

열원을 제외한 벽면은 대류열전달에서 열전달의 정도를 나타내는 주요한 무차원수로서 다음과 같이 정의되는 누셀트수(Nusselt number)를 적용하였다.

$$Nu = \frac{hd}{k} = \int_0^1 \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x=0} dX$$

여기서 h , d 및 k 는 열전달계수, 특성길이 및 열전도도를 각각 나타낸다.

위의 지배방정식을 해석하기 위하여 본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램 ANSYS 의 한 모듈(module) 프로그램인 FLOTRAN/CFD 프로그램을 이용하여 계산을 수행하였다. FLOTRAN/CFD 내에서 모든 변수는 각 요소에서 다항식의 거동을 하는 것으로 가정되어 강성행렬(stiffness matrix)이 얻어진다. 이 강성행렬은 다시 각 열에서 3 개의 대각선 요소를 지닌 행렬(tridiagonal matrix)로 변환되고 최종적으로 반복계산법에 의하여 해가 얻어진다.⁽³⁾

본 연구에서는 내부 유체를 공기로 두고, 난류

와 층류일 경우에 대해 하부 열원이 있는 경우, 우측면에 열원이 있는 경우 그리고 상부에 열원이 있는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 열원의 온도는 1273K 로 일정하게 유지시켰고, 열원에서의 방사율은 완전 흑체로 가정하여 1 로 가정하였다. 나머지 단열 벽면의 방사율은 내화 단열 벽재의 방사율인 0.7 로 두었다. 여기서 방사력의 계산은 스테판 볼츠만의 법칙이 적용된 단위 표면적당 방사되는 복사에너지를 나타낸다. 해석에 사용된 해석방정식은 아래와 같다.

$$E = \frac{q}{A} = \epsilon \sigma T^4$$

E 는 전체 방사력을 나타내고, A 는 표면적, ϵ 은 표면에서의 방사율, σ 은 스테판 볼츠만 상수 (Stefan-Boltzmann constant), T 는 표면적의 온도를 나타낸다. 열원을 제외한 벽면에서의 대류 열전달은 내부 유체의 물성치를 온도에 따른 함수로 적용하였다.⁽⁴⁾

2.1 해석결과

Fig. 2 는 내부 유체가 층류일 경우 해석 결과로 (a)의 하부에 열원이 있을 경우 공기위 유동이 전체적으로 만이 일어나고 (c)와 같이 상부에 열원이 있을 경우는 공기 유동은 일어나지 않고 열원으로부터 하부까지의 점차적인 열전달만 발생함을 알 수 있다. 온도 분포 열시 (a)의 경우 전체적으로 온도가 높고 (c)의 경우는 상부 열원과 하부와의 온도차가 크게 나타났다. (b)와 같이 우측면에 열원이 있을 경우 유동은 열원인 벽면을 따라 상승하여 중심부에서 회전하는 형상의 유동을 보였다.

Fig. 3 은 내부 유체가 난류일 경우의 해석결과를 나타내었다. 층류는 난류와 달리 유동이 불균일하게 일어남으로 온도에 의한 내부 공기의 유동속도가 크게 나타난다. 온도 분포는 하부열원이 있을 경우 층류보다 낮은 온도 분포를 보였다. 우측벽면이 열원일 경우(Fig. 2 의 (b)) 유동은 벽면을 따라 사부로 올라간 후 하부로의 유동이 서서히 발생한다. 온도분포열시 상부에서 하부로 순차적인 열전달 현상을 보임을 알 수 있다. 상부에 열원이 있는 경우(c)는 층류와는 달리 난류에서는 유동이 나타나고, 온도 분포 역시 유동에 의한 열전달이 발생함을 알 수 있다.

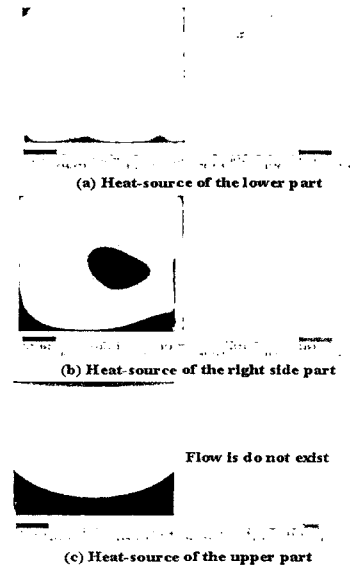


Fig. 2 Heat flow and temperature distribution for laminar flow

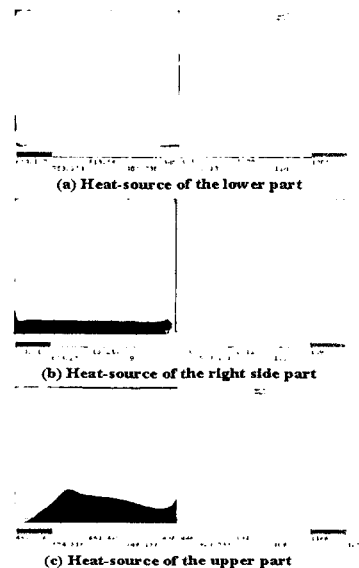


Fig. 3 Heat flow and temperature distribution for laminar flow

3. 노 내부의 유동 및 온도 분포 해석

앞서 수행한 단순한 형상의 밀폐공간에서 열유동 및 열전달의 특성을 연구하였고, 이 연구를 이용해 알루미늄 로의 설계시 내부 구조 적정성 평

가 방법을 시뮬레이션을 통해 정립하였다.

본 연구에 사용된 알루미늄 용탕 보온로의 형상은 Fig. 4에 나타내었다.

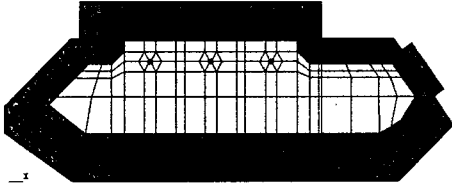


Fig. 4 Geometric of aluminum holding furnace

해석을 위한 모델은 노 내부공간만을 모델링하였다. 해석방법은 알루미늄 용탕이 투입되기 전인 로의 예열시 내부 유동과 시간에 따른 내부 온도변화를 조사하였다. 구속조건은 외부 단열재로 덮인 부분은 유체의 속도를 0으로 두었고 내부의 열원은 3개의 Sic 히터에 일정 온도로 발열하도록 하였고, 시간에 따라 점차적으로 온도를 내려 내부 온도가 1027K가 되도록 하였다. 내화재로의 열전달은 대류 열전달에 의해 열을 빼앗기는 것으로 가정하고 공기와 내화재의 경계면에 온도에 따른 대류열전달을 적용하였다.

Fig. 5는 알루미늄 노 내부의 열유동 해석결과를 나타낸 것이다. 유동은 열원부에서 상부로 활발하게 발생하고, 상부 내화재에서 하부로 가장자리를 따라 흐름을 알 수 있다.



Fig. 5 Heat flow of aluminum holding furnace

Fig. 6은 시간에 따른 로 내부의 온도분포를 나타내었다. 1시간까지는 히터의 온도를 1641K로 일정하게 유지 시켰고, 이후는 로 내부의 온도를 작업하기에 알맞은 온도로 유지 시켰다. 시간에 따른 온도 그래프는 Fig. 7에 나타내었고, 로 예열시 총 시간은 약 5시간 반 정도의 시간이 걸렸다. 일반적인 로의 예열시간은 5~7시간이 걸리는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 해석 결과는 실제 예열 시간과 유사하게 나타나므로 새로운 로 제품 개발시 좋은 지침이 될 것으로 판단된다.

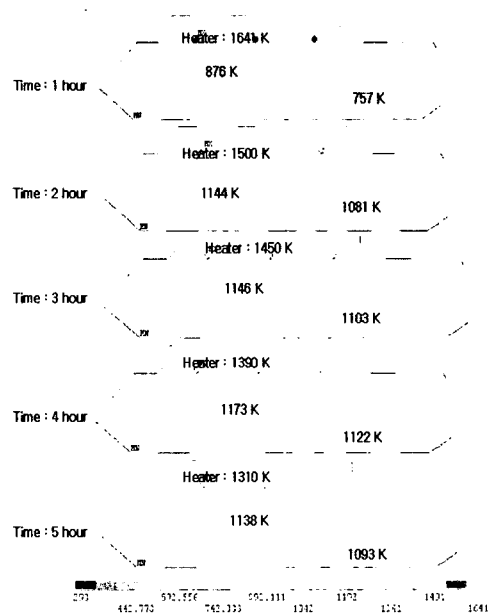


Fig. 6 Temperature distribution of aluminum holding furnace for time pass

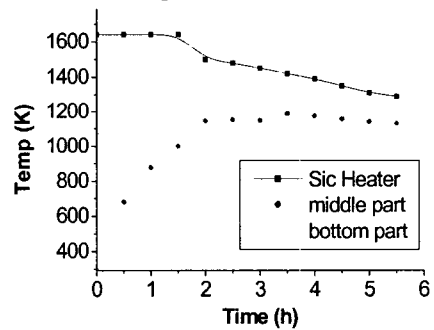


Fig. 7 Temperature change curve for time pass

참 고 문 헌

- (1) De vahl G, Davis, "Laminar Natural Convection in an Enclosed Rectangular Cavity" Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 11, pp. 1675~1693, 1968.
- (2) Wilkes, J. O. and Churchill, S. W., "The finite-difference Computation of Natural Convection in a Rectangular Enclosure," A.I. Ch. E. Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 161~166, 1966.
- (3) ANSYS User's Manual, SAS IP, 1995
- (4) J.M. Hyun and J.W. Lee, Int. J. Heat and Fluid Flow, 10, pp.146~151, 1986.